UV-B 与重金属 Cd 双重胁迫对麦长管蚜种群生长发育和繁殖的影响

王　萍[1]，杜一民[1]，杨　杰[1]，车文艳[1]，高欢欢[2]，赵惠燕[1,*]，胡祖庆[1]，胡想顺[1]

（1. 西北农林科技大学植物保护学院，旱区作物逆境生物学国家重点实验室，陕西杨凌 712100；
2. 山东农业科学院植物保护研究所，济南 250100）

摘要：【目的】为探究 UV-B 和重金属 Cd 双重胁迫对麦长管蚜 *Sitobion avenae*（Fabricius）生长发育和繁殖的影响，以及 UV-B 和重金属 Cd 两因素间的交互作用。【方法】在室内，不同辐射强度 UV-B（0, 0.1, 0.2 和 0.7 mW/cm^2）与不同浓度重金属 Cd（0, 20, 40, 80 和 160 mg/kg）处理后，采用特定年龄生命表方法，统计麦长管蚜种群参数、繁殖参数、存活率和繁殖力的变化。【结果】麦长管蚜种群的生命表各参数受 UV-B 与重金属 Cd 双重胁迫影响显著，且 UV-B 对麦长管蚜的生命表各参数影响要大于重金属 Cd；UV-B 和重金属 Cd 两因素间存在交互作用。同一重金属 Cd 浓度时，随着 UV-B 辐射强度的增加，麦长管蚜种群的内禀增长率 r、周限增长率 λ、净增殖率 R_0、繁殖力 F、产仔天数和成虫寿命均呈现先下降后上升的趋势，且均在 UV-B 辐射强度为 0.2 mW/cm^2 时下降至最低点；而麦长管蚜种群的平均世代周期 T 则呈现先升高后下降的趋势，且在 UV-B 辐射强度为 0.1 mW/cm^2 时上升至最高点。同一 UV-B 辐射强度下，随着重金属 Cd 浓度的增加，麦长管蚜种群生命表各参数均呈现波动变化；双重胁迫处理组麦长管蚜种群内禀增长率 r、周限增长率 λ、净增殖率 R_0、繁殖力 F、产仔天数和成虫寿命均显著低于单一重金属 Cd 处理组，而其平均世代周期 T 显著高于单一重金属 Cd 处理组，且双重胁迫处理组生命表各参数的峰值点较单一因素重金属 Cd 处理组均呈现不同程度的提前。【结论】UV-B 与重金属 Cd 影响麦长管蚜种群的生长发育和繁殖，且由于这两因素间存在交互作用，二者双重胁迫对麦长管蚜种群的生长发育和繁殖影响更加严重。

关键词：麦长管蚜；UV-B 辐射；重金属；镉；双重胁迫；生命表

中图分类号：Q968　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2016)01-0055-09

Effects of the dual stress of UV-B and cadmium on the growth, development and fecundity of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae)

WANG Ping[1], DU Yi-Min[1], YANG Jie[1], CHE Wen-Yan[1], GAO Huan-Huan[2], ZHAO Hui-Yan[1,*], HU Zu-Qing[1], HU Xiang-Shun[1] (1. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: 【Aim】 To explore the effects of the dual stress of UV-B and cadmium on the growth, development and fecundity of *Sitobion avenae* (Fabricius), and to determine whether there is the interaction between UV-B and cadmium. 【Methods】 The age-specific life table was employed to explore the effects of the co-stress of different intensities of UV-B (0, 0.1, 0.2 and 0.7 mW/cm^2) and concentrations of cadmium (0, 20, 40, 80 and 160 mg/kg) on the growth, development and fecundity of *S. avenae* in the laboratory. 【Results】 The life table parameters of *S. avenae* were adversely influenced by the dual stress of UV-B and cadmium, and they were affected more severely by UV-B than by cadmium stress. In addition, there are significant interactions between the stress of UV-B and cadmium. In particular,

基金项目：国家自然科学基金项目(39970112, 30470268)；高校博士点基金(20130204110004)；陕西省科技厅国际合作项目(2012)
作者简介：王萍，女，1989 年生，山东济宁人，硕士研究生，研究方向为昆虫生态学与害虫综合治理，E-mail：happynewyear668@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhaohy@nwsuaf.edu.cn
收稿日期 Received: 2015-08-05；接受日期 Accepted: 2015-11-25

under the same concentration of cadmium treatments, the effects of UV-B on the intrinsic rate of increase (r), the finite rate of increase (λ), the net rate of increase (R_0), fecundity (F), oviposition duration and adult longevity of *S. avenae* showed a trend of first decreasing and then increasing, and fell to the minimum value under the intensity of 0.2 mW/cm^2 of UV-B. However, the mean length of a generation (T) revealed an adverse trend, namely showing a trend of first increasing and then decreasing, and reached the first peak at the intensity of 0.1 mW/cm^2 of UV-B. Under the same intensity of UV-B radiation, with the increase of the concentrations of cadmium, all life table parameters of *S. avenae* displayed fluctuation. Moreover, the parameters of r, λ, R_0, F, oviposition duration and adult longevity of *S. avenae* in the combined treatments were significantly lower than those in the treatments only exposed to different concentrations of cadmium. However, the parameter T revealed a reverse result. Every peak point or minimum value of all above life table parameters of *S. avenae* exposed to the dual stress of UV-B and cadmium was somewhat earlier than that only exposed to different concentrations of cadmium. 【Conclusion】The growth, development and fecundity of *S. avenae* were significantly affected by the stress of UV-B and cadmium. Moreover, the influences will be intensified when the two factors act in combination, suggesting that these two factors have significant interactions.

Key words: *Sitobion avenae*; UV-B radiation; heavy metal; cadmium (Cd); dual stress; life table

自然界中存在各种辐射,对整个生物圈和生态环境产生了强大的选择压力,特别是短波辐射中的紫外线(UV)。近年来,随着环境污染导致的臭氧层破坏,使得到达地球表面的 UV 辐射剂量特别是其中间波段 UV-B (280 ~ 320 nm)辐射剂量逐年增加(McKenzie *et al*., 2007),对生物(包括昆虫)在生理生化及行为方面产生了一定的影响(Nguyend *et al*., 2009; 张丽等, 2013; 周冬等, 2014)。有些学者研究发现,UV-B 可以通过产生活性氧和自由基进而破坏生物机体内 DNA、蛋白质、脂质、生物膜以及电子传递链的结构和功能(Yannarelli *et al*., 2006; 都二霞等, 2006; Nguyend *et al*., 2009; 魏晓雪等, 2011);此外,UV-B 还可对植物体内各种营养物质以及次生物质的含量产生不同程度的影响,进而间接影响以植物为食的昆虫的取食行为、生理生化代谢和生长发育(Kuhlmann and Müller, 2010, 2011; Hu *et al*., 2013)。

另一方面,除 UV-B 以外,由于农药和化肥过量使用、城市污水等大量排放以及金属矿业的发展所造成的重金属污染,特别是镉(Cd)的污染成为又一严重的环境问题。这种污染不仅会对生态环境、生态平衡与生物多样性产生潜在的威胁,还可以通过食物链转移、累积及富集,进而对生物有机体内的代谢、遗传与生长发育产生影响(王宏镔等, 2005)。Gao 等(2012)在研究重金属 Cd 胁迫对麦长管蚜生命表参数的影响时,发现不同浓度重金属 Cd 处理土壤后,在一定范围内,随着其处理浓度的升高,小麦叶片中重金属 Cd 的含量呈非线性递增。重金属 Cd 在昆虫体内的富集对昆虫的进化也施加了强大的选择压力,可使其发育历期、体重、繁殖力、产卵量、死亡率和种群数量发生变化(Ruohomäki *et al*., 1996; Mousavi *et al*., 2003; Hayford and Ferrington, 2005; 王慧等, 2006; 孙虹霞等, 2007; Gao *et al*., 2012)。此外,有研究发现,家蚕 *Bombyx mori* 在取食含有 Cd 的食物后,出现明显的滞育、体长下降、机体内细胞损伤和凋亡及细胞活力下降的现象(朱玉芳等, 2006),且随着胁迫浓度的增加,细胞凋亡速率增加,细胞活力逐渐下降,并存在显著的剂量-反应关系(Braeckman *et al*., 1997)。

麦长管蚜 *Sitobion avenae* 是目前小麦生产中重要的农业害虫,是典型 r 对策者。它的孤雌生殖、生命周期短、繁殖快、世代重叠等生物学特性使得其能很快适应环境的变化,是研究环境胁迫很好的实验材料。目前,UV-B 或重金属 Cd 单一类因素对麦长管蚜种群生理生化指标及生长发育的直接或间接影响已经有研究证实(Brulle *et al*., 2006; Nguyend *et al*., 2009; Kuhlmann and Müller, 2010, 2011; Gao *et al*., 2012; 高欢欢等, 2013),但两类因素双重胁迫对麦长管蚜生长发育和繁殖的影响还没有相关文献报道。由于自然界中紫外辐射和重金属的胁迫是同时存在的,研究双重胁迫更为客观和实际。研究双重胁迫对蚜虫的影响是否与单一胁迫影响一致,能否导致物种灭绝或种群数量下降,不仅对于害虫防治而且对于生物遗传进化都有重要的理论意义和应用价值。因此,本研究通过不同辐射强度的 UV-B 和不同浓度的重金属 Cd 双重胁迫处理麦长管蚜,

探究 UV-B 和重金属 Cd 双重胁迫对麦长管蚜生长发育和繁殖的影响，以及两因素间是否存在交互作用，以期为环境胁迫条件下蚜虫遗传进化和防治提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

本实验采用的小麦品种为 1376（西北农林科技大学小麦改良中心提供），供试虫源采自陕西杨凌小麦试验田（34°16′N，108°4′E）的单头无翅麦长管蚜，并在西北农林科技大学昆虫生态实验室内进行多代饲养而得到的麦长管蚜单克隆种群。

1.2　重金属 Cd 处理

将烘干后的土壤、基质与细沙按照 2∶2∶1（m/m）的比重混匀后，分别称量 1 kg 放入规格 23 cm × 23 cm × 17 cm 规格的花盆中。挑选颗粒大小一致的小麦种子，每盆种植 30 粒小麦种子，待出苗 1 d 后，浇灌 $CdCl_2$ 溶液（由 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ 配制）。重金属 Cd 处理浓度的选择依据高欢欢等（2012）的研究，使土壤中重金属 Cd 的终浓度分别为 20，40，80 和 160 mg/kg，对照组浇灌等量的蒸馏水，共 5 个处理，每个处理重复 3 次。小麦在温度为 20 ± 1℃，相对湿度为 60% ± 5%，光周期为 16L∶8D 的人工气候箱中培养，每天按需等量浇水。

1.3　UV-B 处理

UV-B 处理采用张丽等（2013）的方法，试验处理的光源选用普通日光灯管及紫外灯管发射的光源，其中紫外灯管均匀的分布在普通日光灯管中间，用滤光器 UVILEX™ 390 Z（SCHOTT Inc.，中国上海）去除普通日光灯灯光中的紫外线，并用 Schott N-WG280 滤光膜罩在紫外灯管外使得其发射的光源只有 UV-B 波段的光可以透过。对照组采用普通日光灯管作为光源，低强度辐射组（0.10 mW/cm^2）采用 1 支紫外灯管和普通日光灯管，中强度辐射组（0.20 mW/cm^2）采用 2 支紫外灯管与普通日光灯管，高强度辐射组（0.70 mW/cm^2）采用 4 支紫外灯管及普通日光灯管，各处理中白光强度均为 75 μmol 光量子/$m^2 \cdot s$［光合有效辐射（photosynthetically active radiation，PAR）］，UV-B 辐射强度采用 UV-B 测量仪（VLX-3W，Vilber Lourmat Inc.，法国托尔西）测量。不同重金属 Cd 浓度处理下的小麦生长至 14 日龄（二叶期至三叶期）时，剪下叶片固定于盛有琼脂的培养皿（直径 90 mm，NEST 生物技术有限公司）中，每皿放 30 头初产若蚜（0 – 2 h），置于不同紫外强度下处理 16 h，即对照组、低强度辐射组、中强度辐射组和高强度辐射组，每个处理设置 3 个重复。

1.4　生命表研究

放置一层沾湿滤纸于培养皿（直径 60 mm，NEST 生物技术有限公司）中，挑取不同重金属 Cd 浓度下生长的新鲜小麦叶片于滤纸上，挑取不同强度 UV-B 辐射后的 1 龄若蚜于叶片上进行单头饲养，共分为 20 个处理，每个处理设定 3 个重复，每个重复 30 头蚜虫重复。每天定时记录其蜕皮、生长及产仔情况，待麦蚜发育至成虫产仔时，将每天所产仔蚜移出培养皿，定时更换新鲜的小麦叶片。

1.5　数据处理

采用特定年龄生命表方法来记录麦长管蚜的蜕皮、生长及产仔情况，所得的原始记录结果采用 TWOSEX-MSChart（Chi，2014）进行分析，分析方法如 Chi（1985，1988）以及 Reddy 和 Chi（2015）。将所得的生命表数据采用 SPSS 19.0 对 UV-B 辐射强度与重金属 Cd 浓度等 2 个因素进行双因素方差分析（Two-way ANOVA），通过双因素方差分析中的主体间效应检验验证两因素间的交互作用；单因素方差分析（One-way ANOVA）采用 Student-Newman-Keuls（SNK）多重比较检验法进行多重比较，各处理间的显著性差异均设为 $P < 0.05$ 水平，极显著性差异均设为 $P < 0.01$ 水平，用 Sigma Plot 12.5 作图。

2　结果

2.1　不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 胁迫下麦长管蚜种群的存活繁殖曲线

不同辐射强度 UV-B 与不同浓度重金属 Cd 胁迫下麦长管蚜种群特定年龄存活率（l_x）、繁殖力（m_x）以及净生殖力曲线（$l_x m_x$）如图 1 所示，其中存活率数值由主坐标轴显示，而繁殖力与净生殖力数值由次坐标轴显示。同一重金属 Cd 浓度下，UV-B 辐射强度为低强度（0.1 mW/cm^2）或高强度（0.7 mW/cm^2）的处理组的存活时间较空白对照组和中强度长（0.2 mW/cm^2）（$P < 0.01$），且 UV-B 处理组存活率起始下降点较 CK（空白对照）早、起始产仔时间较 CK 晚、产仔总时间较 CK 时间长，与繁殖力（m_x）和净生殖力（$l_x m_x$）的高峰点较 CK 出现的时间晚且峰点值较 CK 小（$P < 0.01$）。同一 UV-B 辐射强度下，随着重金属 Cd 浓度增加，重金属 Cd 处理组麦长管蚜种群的繁殖力（m_x）和净生殖力（$l_x m_x$）

较空白对照组呈现不同程度的增加($P<0.05$);在重金属 Cd 的处理浓度为 20 与 80 mg/kg 时,不仅麦长管蚜种群的繁殖力(m_x)和净生殖力(l_xm_x)增幅较其他处理组大、存活时间较其他处理组长,而且产仔总时间较其他处理组短($P<0.05$);此外,在重金属 Cd 的处理浓度为 40 与 160 mg/kg 时,产仔总时间较其他处理组稍长($P<0.05$)。由此可见,UV-B 对麦长管蚜种群的存活与繁殖的影响稳定并显著,且重金属 Cd 对麦长管蚜种群的存活与繁殖也有显著的影响,此外,由于双重胁迫的存在使得 UV-B 与重金属 Cd 对麦长管蚜种群的存活与繁殖的影响更显著。

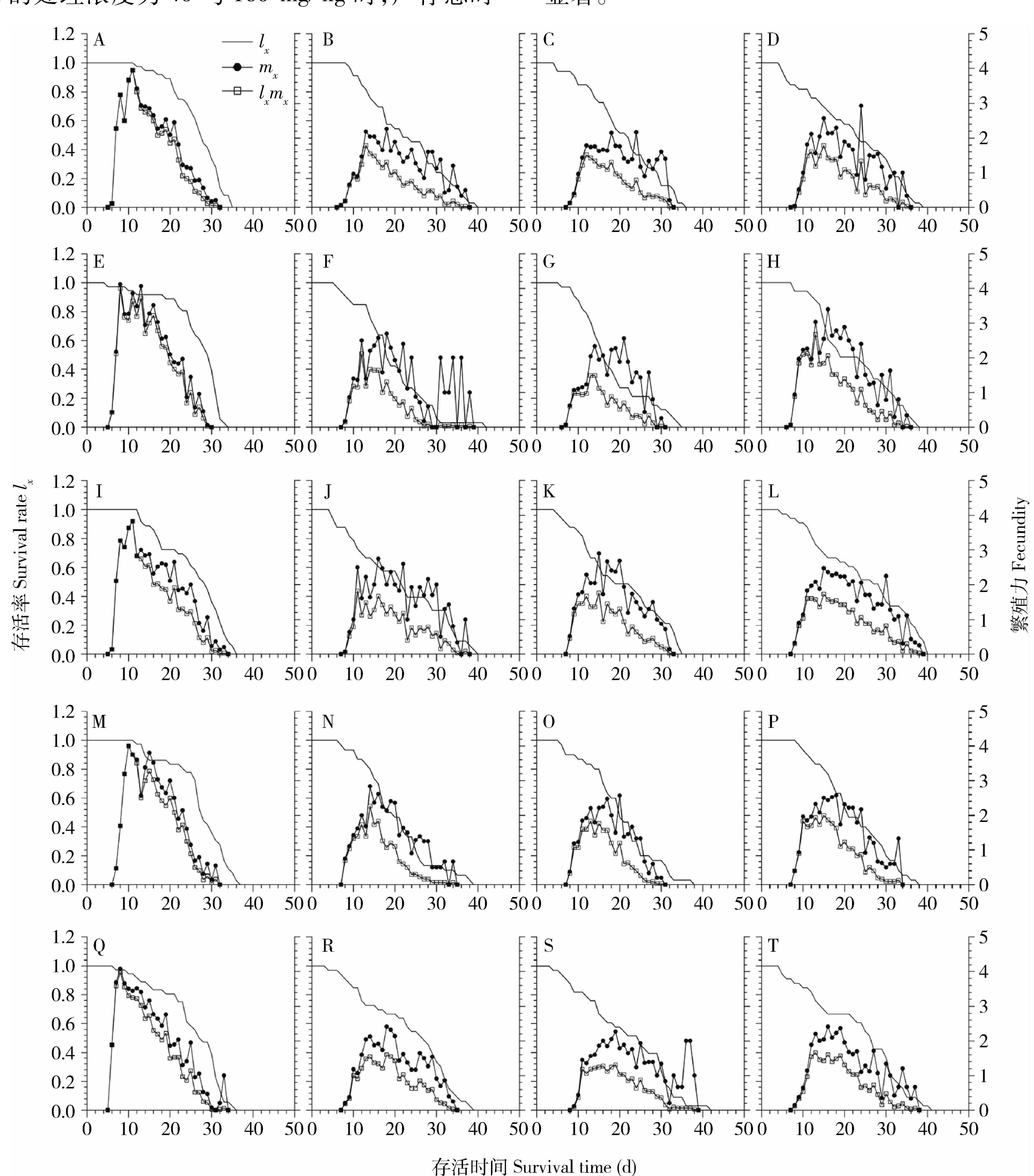


图 1 不同辐射强度 UV-B 与不同浓度重金属 Cd 胁迫下麦长管蚜种群特定年龄存活率、繁殖力以及净生殖力曲线

Fig. 1 Age-specific survival rate (l_x), age-specific fecundity (m_x), and net maternity (l_xm_x) of *Sitobion avenae* exposed to the stress of different intensities of UV-B and different concentrations of Cd

A: 0 mW/cm² UV-B, 0 mg/kg Cd; B: 0.1 mW/cm² UV-B, 0 mg/kg Cd; C: 0.2 mW/cm² UV-B, 0 mg/kg Cd; D: 0.7 mW/cm² UV-B, 0 mg/kg Cd; E: 0 mW/cm² UV-B, 20 mg/kg Cd; F: 0.1 mW/cm² UV-B, 20 mg/kg Cd; G: 0.2 mW/cm² UV-B, 20 mg/kg Cd; H: 0.7 mW/cm² UV-B, 20 mg/kg Cd; I: 0 mW/cm² UV-B, 40 mg/kg Cd; J: 0.1 mW/cm² UV-B, 40 mg/kg Cd; K: 0.2 mW/cm² UV-B, 40 mg/kg Cd; L: 0.7 mW/cm² UV-B, 40 mg/kg Cd; M: 0 mW/cm² UV-B, 80 mg/kg Cd; N: 0.1 mW/cm² UV-B, 80 mg/kg Cd; O: 0.2 mW/cm² UV-B, 80 mg/kg Cd; P: 0.7 mW/cm² UV-B, 80 mg/kg Cd; Q: 0 mW/cm² UV-B, 160 mg/kg Cd; R: 0.1 mW/cm² UV-B, 160 mg/kg Cd; S: 0.2 mW/cm² UV-B, 160 mg/kg Cd; T: 0.7 mW/cm² UV-B, 160 mg/kg Cd.

2.2　不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜种群繁殖参数的变化

由表 1 可知，不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 胁迫处理麦长管蚜后，其种群繁殖参数如繁殖力 *F*、产仔天数和成虫寿命发生了显著变化。同一重金属 Cd 浓度处理下，随着 UV-B 辐射强度的增加，麦长管蚜种群的繁殖力 *F*、产仔天数和成虫寿命都呈现先下降后上升的趋势，且在 UV-B 辐射强度为 0.2 mW/cm^2 时下降至最低点。同一辐射强度 UV-B 处理下，随着重金属 Cd 浓度的增加，麦长管蚜种群的繁殖力 *F*、产仔天数和成虫寿命都呈现波动变化，表明 UV-B 对其种群繁殖参数的影响同样大于重金属 Cd 的影响。

表 1　不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜成虫繁殖参数比较

Table 1　Comparison of the fecundity parameters of *Sitobion avenae* adults under the stress of different intensities of UV-B and different concentrations of Cd

重金属 Cd 浓度(mg/kg) Cd concentration	UV-B 辐射强度(mW/cm^2) UV-B intensity	繁殖力 *F* Fecundity	产仔天数(d) Oviposition duration	成虫寿命(d) Adult longevity
0	0	45.42 ±0.61 Ab	15.06 ±0.25 Aa	19.67 ±0.17 Aa
	0.1	20.79 ±0.26 Cb	9.55 ±0.29 Ba	13.97 ±0.13 Ba
	0.2	18.33 ±0.29 Db	8.76 ±0.47 Ba	12.33 ±0.16 Ca
	0.7	22.12 ±0.36 Bd	9.58 ±0.18 Bbc	13.61 ±0.40 Bb
20	0	49.22 ±0.56 Aa	15.39 ±0.48 Aa	19.72 ±0.15 Aa
	0.1	18.55 ±0.42 Cc	6.64 ±0.29 Cb	10.39 ±0.56 Cc
	0.2	15.09 ±0.19 Dc	5.45 ±0.10 Dc	9.12 ±0.08 Db
	0.7	29.97 ±0.53 Ba	10.15 ±0.24 Bb	13.91 ±0.05 Bb
40	0	45.36 ±0.86 Ab	14.39 ±0.22 Aa	18.83 ±0.19 Ab
	0.1	22.79 ±0.15 Ca	9.58 ±0.27 Ca	13.30 ±0.26 Ca
	0.2	22.09 ±0.43 Ca	8.85 ±0.03 Ca	12.03 ±0.11 Da
	0.7	28.15 ±0.60 Bb	11.61 ±0.50 Ba	15.91 ±0.34 Ba
80	0	47.28 ±0.69 Aab	14.53 ±0.34 Aa	19.39 ±0.14 Aab
	0.1	21.33 ±0.84 Cab	7.13 ±0.34 Cb	11.77 ±0.61 Cb
	0.2	19.90 ±0.72 Cb	7.00 ±0.40 Cb	11.53 ±0.35 Ca
	0.7	25.60 ±0.26 Bc	8.97 ±0.07 Bc	13.30 ±0.29 Bb
160	0	49.08 ±0.21 Aa	15.11 ±0.32 Aa	19.25 ±0.17 Aab
	0.1	22.70 ±0.22 Ba	10.42 ±0.21 Ba	14.73 ±0.23 Ba
	0.2	19.58 ±0.22 Cb	9.00 ±0.37 Ca	12.52 ±0.39 Ca
	0.7	23.15 ±0.18 Bd	10.42 ±0.08 Bb	14.36 ±0.42 Bb

表中数据为平均值 ± 标准误，n 为 3 次重复。数据后不同大写字母表示同一重金属 Cd 浓度下不同 UV-B 辐射强度处理的显著性差异，不同小写字母表示同一 UV-B 辐射强度下不同重金属 Cd 浓度处理的显著性差异(Student-Newman-Keuls 检验，$P<0.05$，one-way ANOVA)。表 2 同。Data in the table are mean ± *SE* (n = 3). Different capital letters following the data indicate significant difference under different intensities of UV-B radiation with the same concentration of Cd, while different lowercase letters following the data indicate significant difference among different concentrations of cadmium with the same intensity of UV-B radiation (Student-Newman-Keuls test: $P<0.05$, following one-way ANOVA). The same for Table 2.

2.3　不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜种群参数的变化

同一浓度的重金属 Cd、不同辐射强度的 UV-B 处理麦长管蚜后，其种群内禀增长率 *r*、周限增长率 λ、净增殖率 R_0 和平均世代周期 *T* 呈现显著差异(表 2)。同一重金属 Cd 浓度下，麦长管蚜的内禀增长率 *r*、周限增长率 λ 与净增殖率 R_0 均随着 UV-B 辐射强度的增强呈现先下降再上升的变化趋势，在 UV-B 辐射强度为 0.2 mW/cm^2 时下降到最低点，且各处理组均显著低于无辐射组，而平均世代周期 *T* 也稳定地呈现先上升后下降的趋势，在 UV-B 辐射强度为 0.1 mW/cm^2 时达到最高点，随后下降。表明麦长管蚜种群参数受 UV-B 影响显著且变化规律稳定。

如表 2 所示，在同一辐射强度的 UV-B 处理组中，随着重金属 Cd 浓度的增加，麦长管蚜种群内禀增长率 *r*、周限增长率 λ、净增殖率 R_0 和平均世代周期 *T* 均呈波动变化，双重胁迫处理组麦长管蚜种群内禀增长率 *r*、周限增长率 λ、净增殖率 R_0 均显著低于单一重金属 Cd 处理组，而其平均世代周期 *T* 显著高于单一重金属 Cd 处理组，且各个参数的峰值点在双重胁迫处理组中较单一重金属 Cd 处理组均呈现不同程度的提前，这表明重金属 Cd 胁迫处理对麦长管蚜种群参数有显著影响，且由于 UV-B 的存在使得 Cd 与 UV-B 双重胁迫比单一重金属 Cd 胁迫效果更显著，这与双因素方差分析中主体间效应检验结果(表 3)一致。

表 2 不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 胁迫后麦长管蚜种群参数的比较

Table 2 Comparison of the population parameters of *Sitobion avenae* adults under the dual stress of different intensities of UV-B and different concentrations of Cd

重金属 Cd 浓度 Cd concentration (mg/kg)	UV-B 辐射强度 UV-B intensity (mW/cm^2)	内禀增长率 Intrinsic rate of increase *r*	周限增长率 Finite rate of increase *λ*	净增殖率 Net productive rate R_0	平均世代周期 Mean generation time *T*
0	0	0.3015 ± 0.0013 Ab	1.352 ± 0.0018 Ab	45.42 ± 0.6130 Ab	12.66 ± 0.0328 Cb
	0.1	0.1855 ± 0.0010 Bc	1.204 ± 0.0013 Bc	20.79 ± 0.2596 Cb	16.36 ± 0.0664 ABb
	0.2	0.1797 ± 0.0019 Cb	1.197 ± 0.0023 Cb	18.33 ± 0.2890 Db	16.19 ± 0.0921 Bb
	0.7	0.1864 ± 0.0014 Bd	1.205 ± 0.0017 Bd	22.12 ± 0.3569 Bd	16.61 ± 0.1106 Aa
20	0	0.3101 ± 0.0015 Ab	1.364 ± 0.0021 Ab	49.22 ± 0.5587 Aa	12.57 ± 0.0328 Cb
	0.1	0.1929 ± 0.0019 Cb	1.213 ± 0.0023 Cb	18.55 ± 0.4186 Cc	15.14 ± 0.1114 Ac
	0.2	0.1858 ± 0.0019 Db	1.204 ± 0.0022 Db	15.09 ± 0.1873 Dc	14.61 ± 0.1353 Bd
	0.7	0.2330 ± 0.0022 Ba	1.262 ± 0.0028 Ba	29.97 ± 0.5288 Ba	14.59 ± 0.1206 Bc
40	0	0.3009 ± 0.0031 Ab	1.351 ± 0.0042 Ab	45.36 ± 0.8553 Ab	12.68 ± 0.0754 Cb
	0.1	0.1848 ± 0.0011 Cc	1.203 ± 0.0013 Cc	22.79 ± 0.1500 Ca	16.92 ± 0.1120 Aa
	0.2	0.2034 ± 0.0023 Ba	1.226 ± 0.0028 Ba	22.09 ± 0.4310 Ca	15.22 ± 0.1498 Bc
	0.7	0.2008 ± 0.0014 Bc	1.222 ± 0.0018 Bc	28.15 ± 0.5965 Bb	16.62 ± 0.2232 Aa
80	0	0.2800 ± 0.0018 Ac	1.323 ± 0.0025 Ac	47.28 ± 0.6867 Aab	13.77 ± 0.1419 Ca
	0.1	0.2079 ± 0.0016 Ba	1.231 ± 0.0019 Ba	21.33 ± 0.8413 Cab	14.71 ± 0.1049 Bd
	0.2	0.2011 ± 0.0022 Ca	1.223 ± 0.0027 Ca	19.90 ± 0.7234 Cb	14.86 ± 0.0380 Bcd
	0.7	0.2123 ± 0.0013 Bb	1.237 ± 0.0016 Bb	25.60 ± 0.2646 Bc	15.27 ± 0.0467 Ab
160	0	0.3360 ± 0.0034 Aa	1.399 ± 0.0047 Aa	49.08 ± 0.2080 Aa	11.59 ± 0.1129 Cc
	0.1	0.1842 ± 0.0023 Bc	1.202 ± 0.0028 Bc	22.70 ± 0.2196 Ba	16.96 ± 0.1713 Ba
	0.2	0.1681 ± 0.0014 Cc	1.183 ± 0.0017 Cc	19.57 ± 0.2196 Cb	17.70 ± 0.1802 Aa
	0.7	0.1838 ± 0.0018 Bd	1.202 ± 0.0021 Bd	23.15 ± 0.1825 Bd	17.10 ± 0.1386 Ba

表 3 不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 胁迫条件下麦长管蚜种群参数主体间效应检验

Table 3 Tests of between-subject effect on the population parameters of *Sitobion avenae* under the dual stress of different intensities of UV-B and different concentrations of Cd

因变量 Dependent variable	源 Source	偏差平方和 Sum of squared deviations	自由度 *df*	*F*	*P*
内禀增长率 Intrinsic increase rate *r*	重金属 Cd 浓度 Cd concentration	0.002	4	46.562	0.000
	UV-B 辐射强度 UV-B intensity	0.142	3	4 216.477	0.000
	重金属 Cd 浓度 * UV-B 辐射强度 Cd concentration × UV-B intensity	0.012	12	85.692	0.000
	误差 Error	0.001	40		
	总计 Total	0.157	59		
周限增长率 Finite rate of increase *λ*	重金属 Cd 浓度 Cd concentration	0.003	4	41.140	0.000
	UV-B 辐射强度 UV-B intensity	0.235	3	4 273.303	0.000
	重金属 Cd 浓度*UV-B 辐射强度 Cd concentration × UV-B intensity	0.019	12	87.208	0.000
	误差 Error	0.001	40		
	总计 Total	0.258	59		
净增殖率 Net productive rate R_0	重金属 Cd 浓度 Cd concentration	54.270	4	19.255	0.000
	UV-B 辐射强度 UV-B intensity	7 540.591	3	3 567.299	0.000
	重金属 Cd 浓度 * UV-B 辐射强度 Cd concentration × UV-B intensity	233.923	12	27.666	0.000
	误差 Error	28.184	40		
	总计 Total	7 856.968	59		
平均世代周期 Mean generation time *T*	重金属 Cd 浓度 Cd concentration	20.340	4	116.371	0.000
	UV-B 辐射强度 UV-B intensity	121.315	3	925.432	0.000
	重金属 Cd 浓度 * UV-B 辐射强度 Cd concentration × UV-B intensity	32.144	12	61.302	0.000
	误差 Error	1.748	40		
	总计 Total	175.547	59		

麦长管蚜种群参数，如内禀增长率 r、周限增长率 λ、净增殖率 R_0 和平均世代周期 T 受不同浓度重金属 Cd 与不同辐射强度 UV-B 影响差异显著（表 2）。对麦长管蚜种群的内禀增长率 r、周限增长率 λ、净增殖率 R_0 和平均世代周期 T 进行双因素方差分析，其主体间效应检验结果表明，重金属 Cd 浓度、UV-B 辐射强度以及二者双重胁迫均对麦长管蚜种群参数产生了显著影响（表 3）。此外，由各偏差平方和在总偏差平方和中所占的比例表明：UV-B 辐射强度对种群参数产生影响的贡献最大，重金属 Cd 浓度最小。由于交互作用的存在，重金属 Cd 与 UV-B 互作时对麦长管蚜种群参数的影响最为显著，这与对麦长管蚜种群生长发育与繁殖的影响结果是一致的。

3 结论与讨论

本研究中，将麦长管蚜种群特定年龄生命表中的种群参数、繁殖参数、存活率和繁殖力作为研究 UV-B 和重金属 Cd 双重胁迫的生物指标，探索不同辐射强度 UV-B 和不同重金属浓度 Cd 处理组间对麦长管蚜种群生长发育和繁殖的影响。实验结果表明，UV-B 和重金属 Cd 分别对麦长管蚜上述生物指标产生了显著影响，并且两因素间还存在显著的交互作用，双重胁迫加重了单一因素对麦长管蚜上述生物指标的影响。

UV-B 和重金属 Cd 无论是单一胁迫还是双重胁迫，对麦长管蚜种群参数的影响大多数都呈现规律性的波动变化。同一重金属 Cd 浓度下，随着 UV-B 辐射强度的增加，麦长管蚜种群的内禀增长率 r、周限增长率 λ、净增殖率 R_0、繁殖力 F 等生命表各参数均呈现先下降后上升的变化趋势，这可能是与低剂量时，由于存在 UV-B 的胁迫不利于麦长管蚜的生长和发育，当 UV-B 的胁迫剂量达到一定阈值以后，麦长管蚜体内启动补偿机制有关。这与之前张丽等（2013）和杜一民等（2014）的研究结果，高强度 UV-B 辐射不利于麦长管蚜种群的生长发育与繁殖并不一致。这可能是因为研究时所选择的 UV-B 处理方式不同造成的，前人选择的都是全世代 UV-B 胁迫处理，而本研究仅是利用 UV-B 短时间处理 1 龄若蚜，后期无 UV-B 的持续辐射，麦长管蚜可能是利用自身的修复机制缓解了 UV-B 辐射产生的影响。

同一 UV-B 辐射强度下，随着重金属 Cd 浓度的增加，其中麦长管蚜种群的内禀增长率 r、周限增长率 λ、净增殖率 R_0 规律相似，呈现先上升、下降、上升后再下降的趋势，其中不同浓度重金属 Cd 的处理结果和高欢欢等（2012）的研究结果相似，这与麦长管蚜种群自身适应环境压力的机制有关，可能是因为低浓度重金属 Cd 刺激时麦长管蚜机体产生适应性反应，即毒物兴奋效应（Axelrod *et al.*, 2004）而使得这些参数的数值出现了暂时的上升，又因为重金属 Cd 对于麦长管蚜的生长是不利因素，随着重金属 Cd 胁迫的增强，会抑制麦长管蚜种群的生长发育，但是，当重金属 Cd 胁迫达到一定阈值时，其机体内可能会启动补偿机制，如机体内一些保护酶活性的变化或胁迫相关基因表达量增加（高欢欢等，2013），以适应重金属 Cd 的胁迫。因此，麦长管蚜在环境胁迫条件下如何调控自身的补偿机制和修复机制需要进一步研究。

已有的研究表明，当蚜虫受到不同的胁迫时，其机体内的应对机制是复杂多样的，涉及众多层面的不同领域，包括蛋白组学中与糖酵解途径、线粒体内能量传递链、细胞骨架等相关的一些酶的含量、基因碱基、基因（保护酶基因、细胞色素 b 基因、热激蛋白基因、金属硫蛋白基因和 AchE 基因）表达水平及保护酶活性等的变化。例如，Nguyend 等（2009）在对温度和辐射双重胁迫对马铃薯长管蚜 *Macrosiphum euphorbiae* 蛋白质组学分析的研究中，发现 UV 辐射可导致马铃薯长管蚜机体内与糖酵解途径、线粒体内能量传递链、细胞骨架等相关的一些酶的含量存在显著性的差异。都二霞等（2007）用紫外处理桃蚜 *Myzus persicae*（Sulzer）后其线粒体基因 *CO* Ⅰ-Ⅱ 碱基发生了变化。此外，有研究表明，UV-B 对麦长管蚜机体内氧化酶体系有影响，如对 SOD，POD 和 CAT 等酶的活性和细胞色素 b 基因和 SOD 基因的表达水平影响显著（盖民昊等，2010；周冬等，2014）。Brulle 等（2006）研究发现，在 Cd 浓度为 80 和 800 mg/kg 的条件下，热激蛋白、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和金属硫蛋白的表达水平发生了不同程度的变化。高欢欢等（2013）在研究长期镉胁迫麦长管蚜时，发现低浓度促进其体内超氧化物歧化酶和乙酰胆碱酯酶基因的表达，高浓度时抑制它们的表达水平。而麦长管蚜对 UV-B 和重金属 Cd 的防御机制是否相同尚不可知。本研究只是就麦长管蚜在 UV-B 和重金属 Cd 双重胁迫后，对其种群生命表各参数的变化进行了研究，至于其在环境胁迫条件下的调控机制还需要对其相关基因及其所在的代谢通路进行进一步探究，从而阐述麦长管蚜对于外界条件的应对机制，进而为麦长管蚜的适应、进化研究和防治奠定理论基础。

参考文献（References）

Axelrod D, Burns K, Davis D, von Larebeke N, 2004. "Hormesis" – an inappropriate extrapolation from the specific to the universal. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 10(3): 335 – 339.

Braeckman B, Raes H, van Hoye D, 1997. Heavy metal toxicity in an insect cell line: effects of cadmium chloride mercuric and methylmercuric chloride on cell viability and proliferation in *Aedes albopictus* cells. *Cell Biology and Toxicology*, 13: 389 – 397.

Brulle F, Mitta G, Cocquerelle C, Vieau D, Lemiere S, Lepretre A, Vandenbulcke F, 2006. Cloning and real-time PCR testing of 14 potential biomarkers in *Eisenia fetida* following cadmium exposure. *Environmental Science & Technology*, 40: 2844 – 2850.

Chi H, 1988. Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rate among individuals. *Environ. Entomol.*, 17(1): 26 – 34.

Chi H, 2014. TWOSEX-MSChart: a computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. Available online at: http://140.120.197.173/Ecology/.

Chi H, Liu H, 1985. Two new methods for the study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica*, 24(2): 225 – 240.

Du EX, Guo JW, Zhao HY, 2006. UV-induced DNA mutation of peach aphid. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(7): 1245 – 1249. [都二霞, 郭剑文, 赵惠燕, 2006. 紫外辐射诱导桃蚜 DNA 变异. 应用生态学报, 17(7): 1245 – 1249]

Du EX, Zhao HY, Guo JW, 2007. UV-induced ecological response and *CO* Ⅰ-Ⅱ mutation of *Myzus petsicae*. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 35(9): 123 – 126. [都二霞, 赵惠燕, 郭剑文, 2007. 紫外线诱导对桃蚜生态学及线粒体基因 *CO* Ⅰ-Ⅱ 突变的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35(9): 123 – 126]

Du YM, Wang P, Yang J, Zhou D, Li GY, Zhao HY, Hu ZQ, Hu XS, 2014. Effects of UV-B radiation intensity and duration on the growth, development, and fecundity of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(12): 1395 – 1401. [杜一民, 王萍, 杨杰, 周冬, 李广雨, 赵惠燕, 胡祖庆, 胡想顺, 2014. 不同强度与持续时间 UV-B 辐射对麦长管蚜生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 57(12): 1395 – 1401]

Gai MH, Chen Q, Hu ZQ, Hu XS, Zhao HY, 2010. Cloning and sequence analysis of cytochrome b gene and SOD gene in *Sitobion avenae* under the ultraviolet induction. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 38(11): 167 – 172. [盖民昊, 陈堑, 胡祖庆, 胡想顺, 赵惠燕, 2010. 紫外诱导下麦长管蚜细胞色素 b 基因和 SOD 基因的克隆与序列分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 38(11): 167 – 172]

Gao HH, Yang J, Bai XH, Zhang L, Zhao HY, 2013. Changes in expression levels of superoxide dismutase and acetylcholine genes in *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) exposed to cadmium for long term. *Acta Entomologica Sinica*, 56(7): 747 – 753. [高欢欢, 杨杰, 白小惠, 张丽, 赵惠燕, 2013. 麦长管蚜在长期镉胁迫下超氧化物歧化酶和乙酰胆碱酯酶基因的表达水平变化. 昆虫学报, 56(7): 747 – 753]

Gao HH, Zhao HY, Du C, Deng MM, Du EX, Hu ZQ, Hu XS, 2012. Life table evaluation of survival and reproduction of the aphid, *Sitobion avenae*, exposed to cadmium. *Journal of Insect Science*, 12(44): 1 – 9.

Hayford BL, Ferrington LC, 2005. Biological assessment of Cannon Creek, Missouri by use of emerging Chironomidae (Insecta: Diptera). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 78(2): 89 – 99.

Hu ZQ, Zhao HY, Thomas T, 2013. Probing behaviors of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) on enhanced UV-B irradiated plants. *Arch. Biol. Sci.*, 65(1): 247 – 254.

Kuhlmann F, Müller C, 2010. UV-B impact on aphid performance mediated by plant quality and plant changes induced by aphids. *Plant Biology*, 12(4): 676 – 684.

Kuhlmann F, Müller C, 2011. Impacts of ultraviolet radiation on interactions between plants and herbivorous insects: a chemo-ecological perspective. *Progress in Botany*, 72: 305 – 337.

McKenzie RL, Aucamp PJ, Bais AF, Björn LO, Ilyas M, 2007. Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 6: 218 – 231.

Mousavi SK, Primicerio R, Amundsen PA, 2003. Diversity and structure of Chironomidae (Diptera) communities along a gradient of heavy metal contamination in a subarctic watercourse. *Science of the Total Environment*, 307: 93 – 110.

Nguyen TTA, Michaud D, Cloutier C, 2009. A proteomic analysis of the aphid *Macrosiphum euphorbiae* under heat and radiation stress. *Insect Biochem. Molec. Biol.*, 39(1): 20 – 30.

Reddy GVP, Chi H, 2015. Demographic comparison of sweetpotato weevil reared on a major host, *Ipomoea batatas*, and an alternative host, *I. triloba*. *Scientific Reports*, online, DOI: 10.1038/srep 11871.

Ruohomäki K, Kaitaniemi P, Kozlov M, Tammaru T, Haukioja E, 1996. Density and performance of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera: Geometridae) along three air pollution gradients in northern Europe. *J. Appl. Ecol.*, 33: 773 – 785.

Sun HX, Liu Y, Zhang GR, 2007. Effects of heavy metal pollution on insects. *Acta Entomologica Sinica*, 50(2): 178 – 185. [孙虹霞, 刘颖, 张古忍, 2007. 重金属污染对昆虫生长发育的影响. 昆虫学报, 50(2): 178 – 185]

Wang HB, Shu WS, Lan CY, 2005. Ecology for heavy metal pollution: recent advances and future prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 25(3): 596 – 607. [王宏镔, 束文圣, 蓝崇钰, 2005. 重金属污染生态学研究现状与展望. 生态学报, 25(3): 596 – 607]

Wei XX, Yu JH, Li DW, Tong L, Pang HH, Zu YG, 2011. Effects of elevated UV-B radiation on lipid peroxidation and antioxidant system in needles of *Pinus koraiensis* seedling. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(5): 54 – 59. [魏晓雪, 于景华, 李德文, 佟璐, 庞海河, 祖元刚, 2011. UV-B 辐射增强对红松幼苗针叶脂质过氧化及抗氧化系统的影响. 林业科学, 47(5): 54 – 59]

Yannarelli GG, Noriega GO, Batlle A, Tomaro ML, 2006. Heme

oxygenase up-regulation in ultraviolet-B irradiation soybean plants involves reactive oxygen species. *Planta*, 224(5): 1154 – 1162.

Zhang L, Zhou D, Yang J, Zhu GP, Zhao HY, Hu ZQ, Hu XS, 2013. Life table parameters and feeding behavior of *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) on wheat under UV-B stress. *Acta Entomologica Sinica*, 56(6): 665 – 670. [张丽，周冬，杨杰，朱国平，赵惠燕，胡祖庆，胡想顺，2013. UV-B 胁迫小麦上麦长管蚜的生命表参数和取食行为. 昆虫学报，56(6): 665 – 670]

Zhou D, Du YM, Yang J, Zhang L, Zhao HY, Hu ZQ, Hu XS, 2014. Effects of UV-B radiation in successive generations on the activities of protective enzymes in the grain aphid, *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(7): 762 – 768. [周冬，杜一民，杨杰，张丽，赵惠燕，胡祖庆，胡想顺，2014. 连续多代 UV-B 照射对麦长管蚜保护酶活性的影响. 昆虫学报，57(6): 762 – 768]

Zhu YF, Xu YX, Zheng XJ, Cui YH, Zhou XW, 2006. Effect of silkworm fed on mixture of Pb^{2+} and Cd^{2+} on its development and inducement of apoptosis. *Science of Sericulture*, 32(1): 125 – 129. [朱玉芳，许雅香，郑小坚，崔勇华，周新文，2006. Pb^{2+}、Cd^{2+} 混合添食对家蚕生长发育及细胞凋亡的影响. 蚕业科学，32(1): 125 – 129]

（责任编辑：赵利辉）